ขั้นตอนวิธีในการลดเวลาสำหรับการจำลองทางเวลาของวงจรเชิงเส้นแบบท่อนใน "เล็ก"

นายเมธี หวังคุณธรรม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2539

ISBN 974-633-358-5

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 17463634

Algorithms to Reduce the Simulation Time for a Time Domain Simulation of Piecewise Linear Circuits in "LEK"

Mr.Methee Hwangkhunnatham

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Electrical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1994

ISBN 974-633-358-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ขั้นตอนวิธีในการลดเวลาสำหรับการจำลองทางเวลาของวงจรเชิงเส้น แบบท่อนใน "เล็ก"
โดย	นายเมธี หวังคุณธรรม
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย ลีลารัศมี

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.สันติ ถุงสุวรรณ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. โคทม อารียา)

.... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย ลีลารัศมี)

.... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย ประสิทธิ์จูตระกูล)

.... กรรมการ
(ดร. สมบูรณ์ แสงวงค์วาณิชย์)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

เมธี หวังคุณธรรม : ขั้นตอนวิธีในการลดเวลาสำหรับการจำลองทางเวลาของวงจรเชิงเส้นแบบท่อนใน "เล็ก" (ALGORITHMS TO REDUCE THE SIMULATION TIME FOR A TIME DOMAIN SIMULATION OF PIECEWISE LINEAR CIRCUIT IN "LEK") อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร. เอกชัย ลีลารัศมี, 84 หน้า. ISBN 974-633-358-5

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการนำเสนอขั้นตอนวิธีใหม่สำหรับการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางเวลาของวงจรเชิงเส้นแบบท่อน ขั้นตอนวิธีนี้ใช้หลักความจริงที่ว่าเมตริกซ์ในส่วนของโปรแกรมที่แก้สมการเชิงเส้นจะมีจำนวนค่าที่แตกต่างกันได้ไม่เกินค่าที่จำกัดค่าหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นเมื่อเพิ่มเทคนิคการจัดการด้านหน่วยความ-จำเพื่อจัดเก็บค่าตัวประกอบแอล-ยูของเมตริกซ์เหล่านี้ เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่เข้าไป จะทำให้แก้สมการเชิงเส้นได้เร็วกว่าการแก้สมการในขั้นตอนวิธีแบบทั่วไปที่ค่าตัวประกอบแอล-ยูจะต้องถูกคำนวณใหม่ทุกครั้ง เนื่องจากว่าเวลาส่วนใหญ่ที่ตัวประมวลผล กลางใช้สำหรับการวิเคราะห์จะอยู่ในส่วนการแก้สมการเชิงเส้นนี้ ขั้นตอนวิธีใหม่นี้จึงสามารถเร่งให้การวิเคราะห์ทางเวลาของวงจรเชิงเส้นแบบท่อนเร็วขึ้นอีกมาก (100-600%) โดยจะนำเสนอเป็น 2 ขั้นตอนวิธีคือ ขั้นตอนวิธีเมตริกซ์แคชที่เพิ่มเทคนิคการจัดเก็บค่าตัวประกอบแอล-ยูไว้เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ และขั้นตอนวิธีแยกตัวประกอบแอล-ยูแบบบางส่วนซึ่งพัฒนาต่อมาจากขั้นตอนวิธีเมตริกซ์แคชโดยมุ่งเน้นที่จะลดปริมาณหน่วยความจำที่ใช้ในการจัดเก็บตัวประกอบแอล-ยู เพื่อให้ขั้นตอนวิธีนี้เร่งความเร็วได้อย่างเต็มที่เมื่อนำไปใช้กับวงจรที่มีขนาดใหญ่

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต เมธี หวังคุณธรรม

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา เอกชัย ลีลารัศมี

ปีการศึกษา 2538 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ....

C615806 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEY WORD: LEK/ Piecewise linear/ Transient Simulation

METHEE HWANGKHUNNATHAM : ALGORITHMS TO REDUCE THE SIMULATION TIME FOR A TIME DOMAIN SIMULATION OF PIECEWISE LINEAR CIRCUIT IN "LEK", THESIS ADVISOR : ASSO.PROF.EKACHAI LEELARASMEE, Ph.d. 84 pp. ISBN 974-633-358-5

This thesis presents new algorithms for the transient analysis of piecewise linear circuits. This algorithm uses the fact that the matrix in the linear equation solving program can only have a finite number of different values. Hence, by adding a memory management technique to store the LU factors of these matrices for future reuse, the linear equation solving can be performed much faster than that of a general-purpose algorithm in which these LU factors have to be recomputed every time. Since most of the CPU analysis time is spent in solving linear equations, the new algorithm can actually speed up the transient analysis of piecewise linear circuits significantly (100-600%). Two algorithms will be shown. The first is a Matrix Cache algorithm which stores LU factors for future reuse. The second is a Partial LU factor algorithm which enables the Matrix Cache algorithm to reduce memory storage for handling large circuits.

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต ....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ....

ปีการศึกษา 2538 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ....

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิดติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รศ.ดร.เอกชัย ลีลารัศมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ของการวิจัยมาด้วยดีดลอด และเนื่องจากทุนการวิจัยครั้งนี้บางส่วนได้รับมาจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) และโครงการศิษย์ก้นกุฏิ จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยระบบเชิงเลข (DSRL) ซึ่งเป็นสถานที่ทำการวิจัยตลอด 2 ปีการศึกษา และขอขอบคุณเพื่อนพี่น้องนิสิตห้องปฏิบัติการวิจัยระบบเชิงเลข และห้องปฏิบัติการวัดคุมทางอุตสาหกรรมทุกท่าน ที่มีส่วนช่วยเหลือในการให้ข้อคิดเห็น คำแนะนำ และกำลังใจ แก่ข้าพเจ้า ทุกท่าน

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงิน และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

เมธี หวังคุณธรรม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญภาพ	ญ
สารบัญตาราง	ฒ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ประวัติความเป็นมาของ “เล็ก 6.0” และแนวเหตุผลของวิทยานิพนธ์	1
1.2 วัตถุประสงค์	4
1.3 ขอบเขตของงานวิทยานิพนธ์	4
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	4
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำวิจัย	5
2. ทฤษฎีพื้นฐาน	6
2.1 ทฤษฎีในการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า	6
2.1.1 ตัวแปรของวงจร	6
2.1.2 การสร้างสมการเมตริกซ์ของวงจรด้วยวิธีโมดิฟายด์โนดัล	6
2.1.3 ตัวอย่างในการสร้างสมการเมตริกซ์ของวงจรไฟฟ้า	7
2.2 ทฤษฎีทางด้านวิธีเชิงตัวเลข	8
2.2.1. การแก้สมการเมตริกซ์ด้วยวิธีแยกตัวประกอบแอล-ยู	9

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.2 การประมาณสมการอนุพันธ์ให้เป็นสมการพีชคณิตโดยวิธี Backward Euler Formula 10

2.2.3 การปรับขนาดขั้นเวลาอัตโนมัติ 11

2.3 วงจรเชิงเส้นแบบท่อน 13

2.3.1 ตัวอย่างของอุปกรณ์เชิงเส้นแบบท่อน 13

2.3.2 การสร้างสมการและการแก้สมการวงจรเชิงเส้นแบบท่อน 14

3. โปรแกรมจำลองการทำงานทางอิเล็กทรอนิกส์ของ "เล็ก 6.0" 15

3.1 ขั้นตอนวิธีการวิเคราะห์วงจรของ "เล็ก 6.0" 15

3.2 ตัวอย่างการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลาของ "เล็ก 6.0" 17

3.3 จับเวลาแต่ละรูทีนที่ใช้ในการคำนวณของโปรแกรม "เล็ก 6.0" 20

4. ขั้นตอนวิธีเมตริกซ์แคชเพื่อลดเวลาในการจำลองทางเวลา 22

4.1 ความซ้ำซ้อนของขั้นตอนวิธีแบบทั่วไปของ "เล็ก 6.0" 22

4.2 ขั้นตอนวิธีเมตริกซ์แคช 26

4.3 โครงสร้างข้อมูลของขั้นตอนวิธีเมตริกซ์แคช 27

4.4 ตัวอย่างของวงจรที่นำขั้นตอนวิธีเมตริกซ์แคชไปใช้ 30

5. ขั้นตอนวิธีการแยกตัวประกอบแอล-ยูแบบบางส่วน 33

5.1 แนวเหตุผลของขั้นตอนวิธี 33

5.2 จากการแยกตัวประกอบแอล-ยูแบบทั่วไปสู่การแยกตัวประกอบแอล-ยูแบบบางส่วน 34

5.3 ขั้นตอนวิธีการแยกตัวประกอบแอล-ยูแบบบางส่วน 38

5.4 โครงสร้างข้อมูลของขั้นตอนวิธีการแยกตัวประกอบแอล-ยูแบบบางส่วน 44

5.5 ตัวอย่างของวงจรที่นำขั้นตอนวิธีการแยกตัวประกอบแอล-ยูแบบบางส่วนไปใช้ 45

5.6 การดัดแปลงขั้นตอนวิธีการแยกตัวประกอบแอล-ยูแบบบางส่วน 48

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6. ทดสอบและวิจารณ์ผล 50

6.1 การทดสอบประสิทธิภาพด้านความเร็วและปริมาณหน่วยความจำที่ใช้ 52

6.2 การทดสอบประสิทธิภาพด้านความแม่นของขั้นตอนวิธี 60

6.3 การทดสอบประสิทธิภาพของเทคนิคแอล-อาร์-ยู 62

6.4 วิจารณ์ผลการทดสอบ 69

7. สรุปผลและข้อเสนอแนะ 70

เอกสารอ้างอิง 72

ภาคผนวก 74

ภาคผนวก ก 75

ภาคผนวก ข 76

ประวัติผู้เขียน 84

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 ภาพเปรียบเทียบการศึกษาการทำงานของวงจรไฟฟ้า (ก) การลงมือต่ออุปกรณ์จริง (ข) การใช้โปรแกรมจำลองการทำงานวงจรไฟฟ้า 1

รูปที่ 1.2 แผนภาพแสดงการทำงานของขั้นตอนวิธีที่สามารถนำค่าตัวประกอบแอล-ยูกลับมาใช้ใหม่ 3

รูปที่ 2.1 ตัวอย่างวงจรที่ไม่สามารถใช้วิธี Node Analysis สร้างสมการโดยตรงได้ 8

รูปที่ 2.2 รูปแบบการเขียนสมการวงจรในรูปสมการเมตริกซ์ 8

รูปที่ 2.3 สมการเมตริกซ์ของวงจรในรูปที่ 2.1 9

รูปที่ 2.4 ภาพอธิบายการแยกตัวประกอบแอล-ยู 9

รูปที่ 2.5 กราฟแสดงผลตอบสนองเชิงเวลาของตัวแปร X ที่จุดเวลาต่างๆ 11

รูปที่ 2.6 ลักษณะสมบัติของไดโอด (ก) ไม่เชิงเส้น (ข) เชิงเส้นแบบท่อน 14

รูปที่ 3.1 แผนภูมิสายงานของขั้นตอนวิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลาของโปรแกรม "เล็ก 6.0" 16

รูปที่ 3.2 โมดูลที่สำคัญในการคำนวณของโปรแกรม "เล็ก 6.0" 17

รูปที่ 3.3 ตัวอย่างวงจรในการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลา 18

รูปที่ 3.4 กราฟแสดงเวลาที่ใช้ในการคำนวณเมื่อเปรียบเทียบที่จำนวนโนดต่างๆกัน 21

รูปที่ 4.1 ตัวอย่างวงจรเชิงเส้นแบบท่อน 22

รูปที่ 4.2 แผนภูมิสายงานของขั้นตอนวิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลาของโปรแกรม "เล็ก 6.0" ที่นำเอาเทคนิคพิเศษของขั้นตอนวิธีเมตริกซ์แคชไปใช้ 26

รูปที่ 4.3 ตัวอย่างโครงสร้างข้อมูลที่ใช้กับขั้นตอนวิธีเมตริกซ์แคช 29

รูปที่ 4.4 โครงสร้างข้อมูลในการจัดเก็บเมตริกซ์ที่ทุกๆค่าขั้นเวลา 29

รูปที่ 4.5 วงจร Buck Converter 30

รูปที่ 5.1 ตัวอย่างวงจรเชิงเส้นแบบท่อน 35

รูปที่ 5.2 แผนภาพแสดงทิศทางในการประมวลผลของการแยกตัวประกอบแอล-ยู 35

รูปที่ 5.3 แผนภูมิสายงานของการแยกตัวประกอบแอล-ยูร่วมกับการทำ complete pivoting 36

รูปที่ 5.4 ตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงของเมตริกซ์ในการแยกตัวประกอบแอล-ยู 37

รูปที่ 5.5 รูปแบบของเมตริกซ์ A สำหรับขั้นตอนวิธีการแยกตัวประกอบแอล-ยูแบบบางส่วน 37

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.6 ลักษณะของคู่เมตริกซ์ที่ใช้ในการแยกตัวประกอบแอล-ยูแบบบางส่วน
(ก) LUed (ข) Mask 41
รูปที่ 5.7 แผนภูมิสายงานการทำงานของขั้นตอนวิธีการแยกตัวประกอบแอล-ยูแบบบางส่วน 43
รูปที่ 5.8 ลักษณะโครงสร้างการจัดเก็บข้อมูลของขั้นตอนวิธีการแยกตัวประกอบแอล-ยูแบบบางส่วน 46
รูปที่ 5.9 แผนภาพการจัดเก็บเมตริกซ์ A ของขั้นตอนวิธีการแยกตัวประกอบแอล-ยูแบบบางส่วน 47
รูปที่ 5.10 การจัดเรียงลำดับของส่วนประกอบในเมตริกซ์ A 49
รูปที่ 6.1 วงจร RLC2 52
รูปที่ 6.2 ผลการจำลองทางเวลาของวงจร RLC2 52
รูปที่ 6.3 วงจร Boost Converter 54
รูปที่ 6.4 ผลการจำลองทางเวลาของวงจร Boost Converter 54
รูปที่ 6.5 วงจร Buck Converter 56
รูปที่ 6.6 ผลการจำลองทางเวลาของวงจร Buck Converter 56
รูปที่ 6.7 วงจร ZVSQRC 58
รูปที่ 6.8 ผลการจำลองทางเวลาของวงจร ZVSQRC 58
รูปที่ 6.9 วงจร RLC2 60
รูปที่ 6.10 วงจร Boost Converter 63
รูปที่ 6.11 วงจร Buck Converter 65
รูปที่ 6.12 วงจร ZVSQRC 67
รูปที่ ข.1 ตัวเชื่อมโยงกับผู้ใช้ของโปรแกรม “เล็ก 6.0” 76
รูปที่ ข.2 (ก) ภาพแสดงหน้าจอในการป้อนอุปกรณ์ของโปรแกรม “เล็ก 6.0”
(ข) ภาพแสดงหน้าจอในการป้อนความต้านทานขนาด 1 โอห์ม 77
รูปที่ ข.3 แผนภาพแสดงการใช้หน่วยความจำของโปรแกรม “เทอร์โบเล็ก” 79
รูปที่ ข.4 แผนภูมิสายงานของขั้นตอนวิธีพล็อตกราฟไปพร้อมกับทำการวิเคราะห์ 81
รูปที่ ข.5 ภาพแสดงหน้าจอในการปรับค่าพารามิเตอร์ในส่วนการพล็อตกราฟแบบอัตโนมัติ 82
รูปที่ ข.6 ผลที่ได้จากการปรับแกน X เป็นแบบต่างๆกัน (ก) Fixed Scale (ข) Auto Adjust 83

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบวิธีต่างๆในการสร้างสมการวงจร 7

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงผลการทำงานของขั้นตอนวิธีเมตริกซ์แคชสำหรับวงจรในรูปที่ 4.5 32

ตารางที่ 5.1 ตารางแสดงถึงการจัดเก็บพารามิเตอร์ในการแยกตัวประกอบแอล-ยูแบบบางส่วน 41

ตารางที่ 5.2 ตารางแสดงผลการทำงานของขั้นตอนวิธีการแยกตัวประกอบแอล-ยูแบบบางส่วน สำหรับวงจรในรูปที่ 4.5 49

ตารางที่ 6.1 ตารางเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแต่ละขั้นตอนวิธีสำหรับวงจร RLC2 53

ตารางที่ 6.2 ตารางเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแต่ละขั้นตอนวิธีสำหรับวงจร Boost Converter 55

ตารางที่ 6.3 ตารางเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแต่ละขั้นตอนวิธีสำหรับวงจร Buck Converter 57

ตารางที่ 6.4 ตารางเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแต่ละขั้นตอนวิธีสำหรับวงจร ZVSQRC 59

ตารางที่ 6.5 ตารางเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดในการคำนวณของแต่ละขั้นตอนวิธีเมื่อใช้ประเภทตัวแปรเป็นแบบความเที่ยงเท่าเดียว 60

ตารางที่ 6.6 ตารางเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดในการคำนวณของแต่ละขั้นตอนวิธีเมื่อใช้ประเภทตัวแปรเป็นแบบความเที่ยงสองเท่า 61

ตารางที่ 6.7 ตารางแสดงถึงรูปแบบเมตริกซ์ A ที่เกิดขึ้นจริงในการจำลองของวงจร Boost converter 63

ตารางที่ 6.8 ตารางแสดงประสิทธิภาพการค้นหาในเมตริกซ์แคชของวงจร Boost converter 64

ตารางที่ 6.9 ตารางแสดงถึงรูปแบบเมตริกซ์ A ที่เกิดขึ้นจริงในการจำลองของวงจร Buck converter 65

ตารางที่ 6.10 ตารางแสดงประสิทธิภาพการค้นหาในเมตริกซ์แคชของวงจร Buck converter 66

ตารางที่ 6.11 ตารางแสดงถึงรูปแบบเมตริกซ์ A ที่เกิดขึ้นจริงในการจำลองของวงจร ZVSQRC 67

ตารางที่ 6.12 ตารางแสดงประสิทธิภาพการค้นหาในเมตริกซ์แคชของวงจร ZVSQRC 68

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 6.13 ตารางเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการคำนวณของแต่ละขั้นตอนวิธี.....69
ตารางที่ ข.1 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในการควบคุมการพล็อตกราฟ.....82